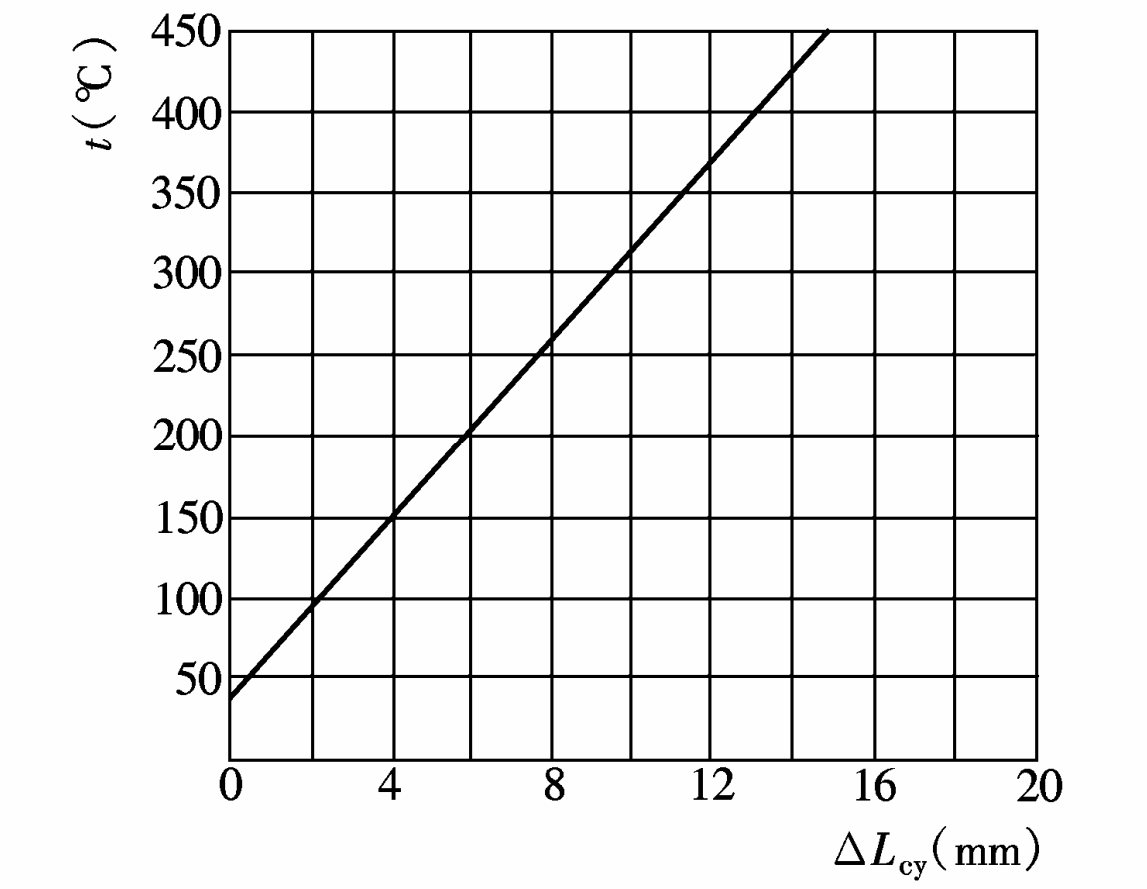




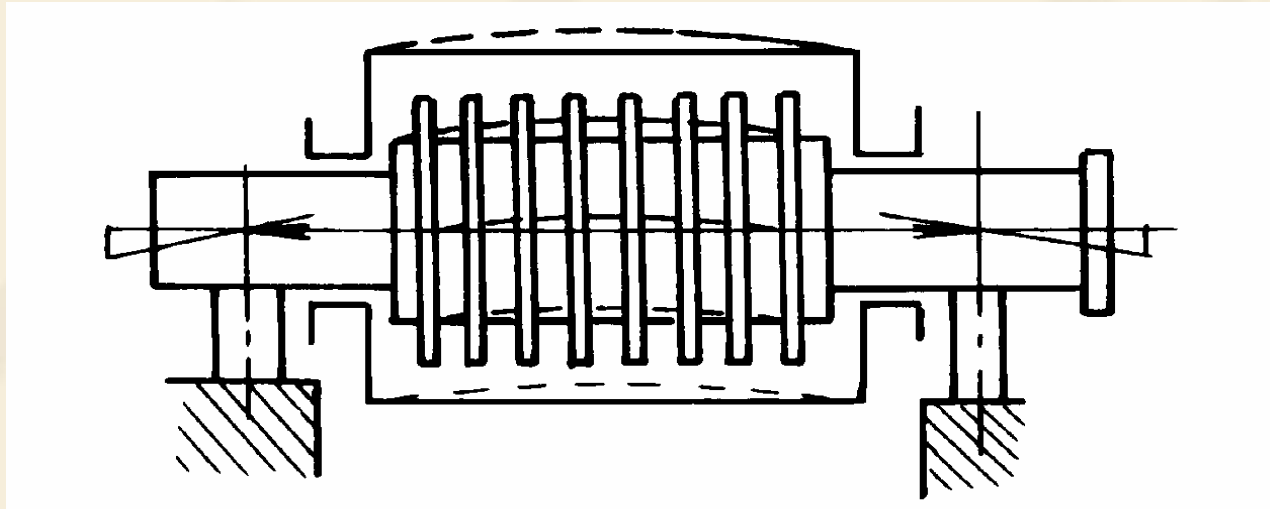
# 第八章 汽轮机运行

# 第一节 汽轮机启停时应注意的主要问题

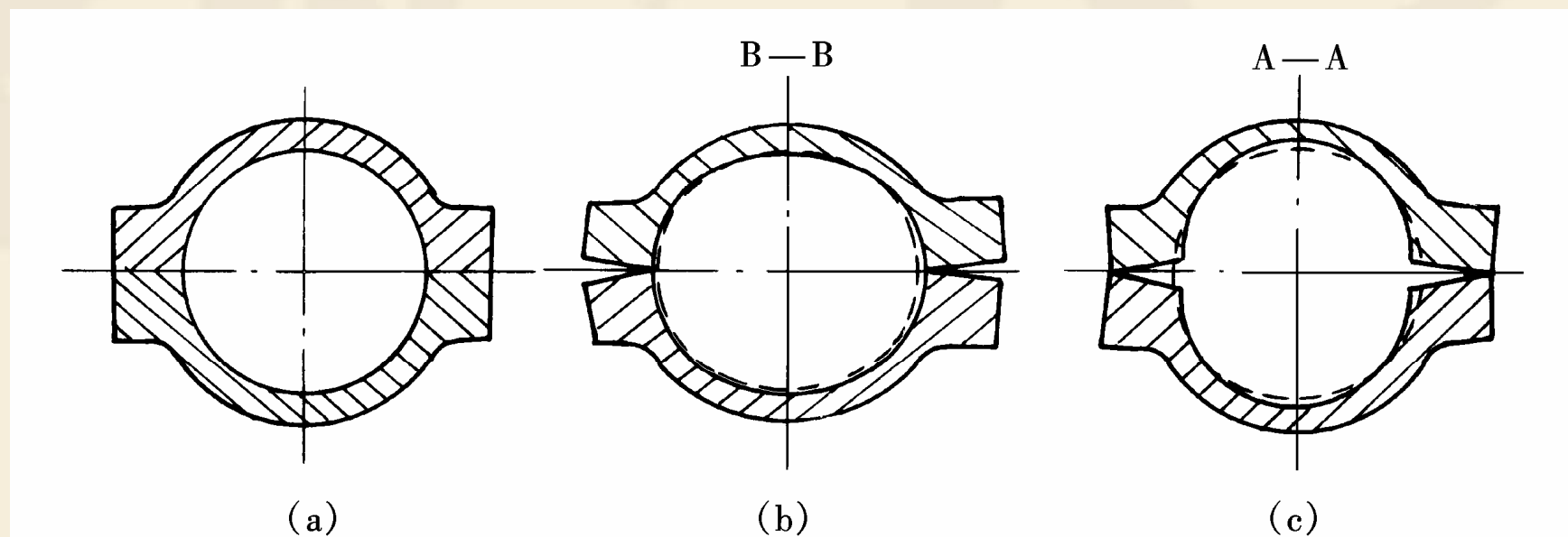
- ❖ 一、汽轮机的受热特点
- ❖ 二、热应力
  - ❖ 1. 汽缸的热应力
  - ❖ 2. 法兰的热应力
  - ❖ 3. 螺栓的热应力
  - ❖ 4. 转子的热应力
- ❖ 三、热膨胀与热变形
  - ❖ （一）热膨胀
    - ❖ 1. 汽缸的热膨胀



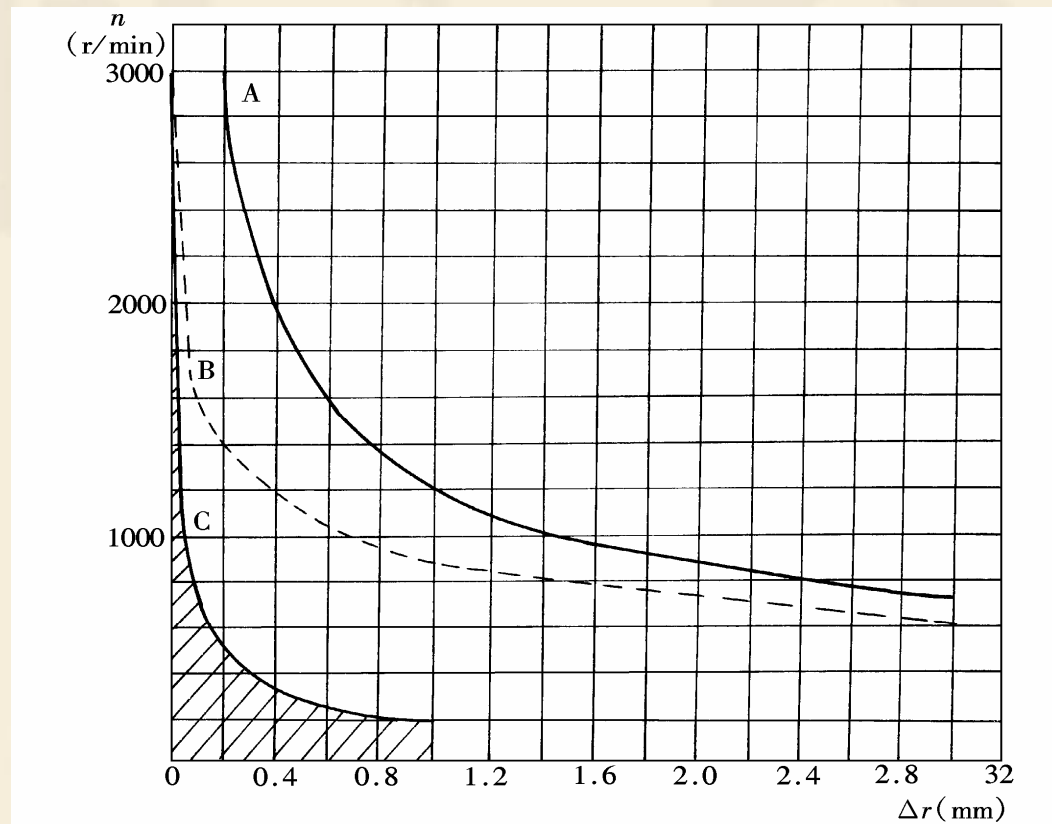
- ❖ 2. 汽缸与转子的相对膨胀
- ❖ (二) 热变形
- ❖ 1. 上下汽缸温差引起的热变形

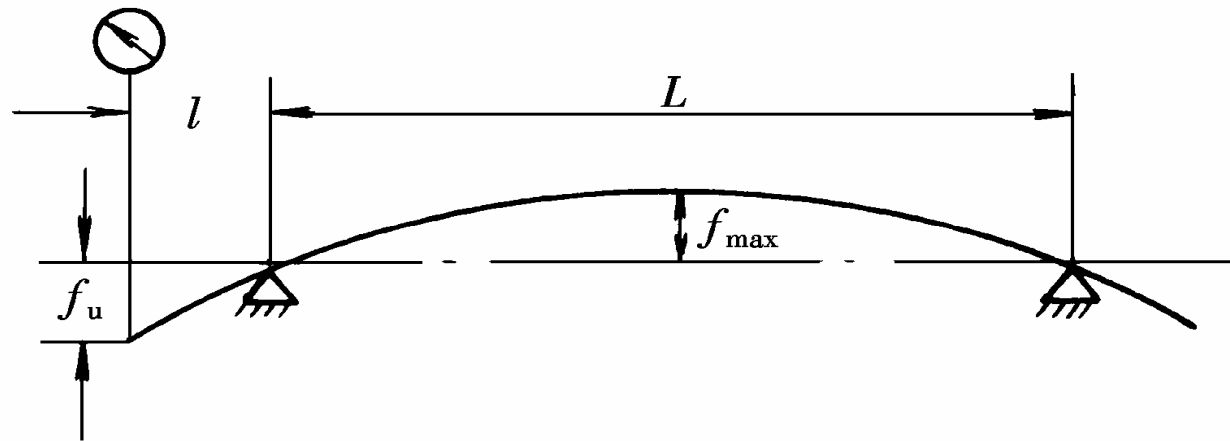


## ❖ 2. 汽缸内外壁和法兰内外壁温差引起的热变形



### ❖ 3. 转子的热弯曲





## 四、汽轮机的寿命管理

- ❖ 汽轮机寿命管理，是实现机组科学管理的一项重要工作。汽轮机使用寿命控制的主要内容，就是在汽轮机启停及变负荷运行时，最大限度的提高启停速度及响应负荷变化的能力，防止裂纹萌生或降低裂纹的扩展速率，延长汽轮机使用寿命，推迟机组的老化，在安全的基础上，实现汽轮机的长期经济运行。
- ❖ 汽轮机的寿命取决于其最危险部件的寿命。



- ❖ 汽轮机的寿命指的就是转子的寿命。一般分为无裂纹寿命和剩余寿命两种。
- ❖ 所谓无裂纹寿命是指转子从初次投入运行到转子出现第一条工程裂纹（约**0.5mm**长，**0.15mm**深）期间能承受的交变载荷的次数。
- ❖ 所谓剩余寿命是指从产生第一条工程裂纹开始直到裂纹扩展到临界裂纹所经历的交变载荷的次数。有关文献指出，这部分寿命约占汽轮机总寿命的**10%**左右，也有人认为此段时间会更长。
- ❖ 无裂纹寿命和剩余寿命之和就是转子的总寿命。

- ❖ 汽轮机寿命管理的任务就是正确评价汽轮机部件的寿命（包括无裂纹寿命和剩余寿命），合理分配机组各种工况下的寿命损耗率。
- ❖ 汽轮机寿命管理包含两层内容：第一是如何合理分配、使用汽轮机的寿命，制定汽轮机寿命分配表，指导运行，以取得最大的经济效益；第二是进行汽轮机寿命的离线或在线监测，对汽轮机寿命和实际损耗做到心中有数，保证汽轮机的安全运行。

- ❖ 1.汽轮机的寿命分配
- ❖ 2. 汽轮机的寿命监测
- ❖ 汽轮机寿命监测就是定期或不定期地对汽轮机寿命的实际损耗情况进行核算，以确保机组的安全运行。
- ❖ 监测的方法有两种：离线监测与在线监测。



## 第二节 汽轮机的启动与停机

- ❖ 一、限制汽轮机启停速度的因素
- ❖ 二、汽轮机的启动方式
  - ❖ （一）按启动过程中新汽参数是否变化分类
    - ❖ 1. 额定参数启动
    - ❖ 2. 滑参数启动
  - ❖ （二）按冲转时进汽方式分类
    - ❖ 1. 高中压缸联合启动
    - ❖ 2. 中压缸启动
  - ❖ （三）按控制进汽量的阀门分类
    - ❖ 1. 调节汽门启动
    - ❖ 2. 自动主汽门和电动主汽门（或旁路门）启动

- ❖ （四）按启动前汽轮机金属（调节级处高压内缸或转子表面）温度水平或停机时数分类
- ❖ 1. 冷态启动。金属温度低于**150~180℃**（或停机一周及以上）。
- ❖ 2. 温态启动。金属温度在**180~350℃**之间（或停机**48h**）。
- ❖ 3. 热态启动。金属温度在**350~450℃**之间（或停机**8h**）。
- ❖ 4. 极热态启动。金属温度在**450℃**以上（或停机**2h**）。

## 三、冷态滑参数启动

- ❖ (一) 启动过程
- ❖ 1. 启动前的准备工作
- ❖ (1) 设备和系统的检查
- ❖ (2) 投入冷却水系统
- ❖ (3) 向凝汽器和闭式冷却系统注入化学补充水
- ❖ (4) 启动供油系统和投入盘车装置
- ❖ (5) 除氧器投入运行
- ❖ (6) 排除启动前机组不允许存在的禁止条件

- ❖ **2.轴封供汽**
- ❖ 真空、凝结水系统、盘车通过轴封向汽轮机供汽暖机
- ❖ **3.盘车预热**
- ❖ **4.冲转、升速、暖机**
- ❖ 暖机的目的主要有两个，即防止材料脆性破坏和过大的热应力。
- ❖ 暖机时应注意如下问题：
  - ❖ **1) 暖机转速应避开临界转速**
  - ❖ **2) 在大型反动式汽轮机中，暖机的目的主要是提高高、中压转子的温度，防止其脆性破坏**
  - ❖ **3) 暖机结束后，应检查汽缸总膨胀和中压缸膨胀情况，并检查记录各处的差胀值**
  - ❖ **4) 对于自启动的汽轮机，暖机时间应根据实际的热应力情况和金属温度情况实际确定。**



## ❖ 5.并网、带负荷

### ❖ 1) 并网

❖ 发电机与系统并网时的要求有：主开关合闸时没有冲击电流；并网后能保持稳定的同步运行。

❖ 为了防止机组并网时出现逆功率工况，机组并网后，立即带初始负荷。冷态启动时，初始负荷通常为机组额定功率的**5%**左右。

### ❖ 2) 初始负荷暖机

### ❖ 3) 升负荷

- ❖ **（二）滑参数启动的特点**
- ❖ 滑参数启动与额定参数启动相比有以下的优缺点：
- ❖ **（1）** 缩短了机组启动时间，提高了机组的机动性。
- ❖ **（2）** 滑参数启动可在较小的热冲击下得到较大的金属加热速度，从而改善了机组加热的条件。
- ❖ **（3）** 滑参数启动时，容积流量大，可较方便地控制和调节汽轮机的转速与负荷，且不至造成金属温差超限。
- ❖ **（4）** 减少了工质的损失，提高了电厂运行的经济性
- ❖ **（5）** 滑参数启动升速和接带负荷时，可做到调节汽门全开全周进汽。
- ❖ **（6）** 滑参数启动时，通过汽轮机的蒸汽流量大，可有效地冷却低压段。
- ❖ **（7）** 滑参数启动可事先做好系统的准备工作，使启动操作大为简化

### ❖ （三）冷态启动的注意事项

#### ❖ 1.控制热应力

#### ❖ 2.控制好高压缸排汽温度

#### ❖ 3.启动曲线

❖ 启动曲线反映了在启动过程中蒸汽初参数、真空度、转速、负荷等与启动时间的关系。这个曲线上，可以获得一次启动的很多重要信息，包括冲转参数、启动时间、暖机转速、暖机次数、暖机时间、升速率、升负荷率、临界转速、蒸汽与金属温度的匹配状况等。每一次启动都要严格按照启动曲线进行。启动曲线的获得一般有三种途径：制造厂提供；同类机组借鉴；本机组运行稳定后试验获得。

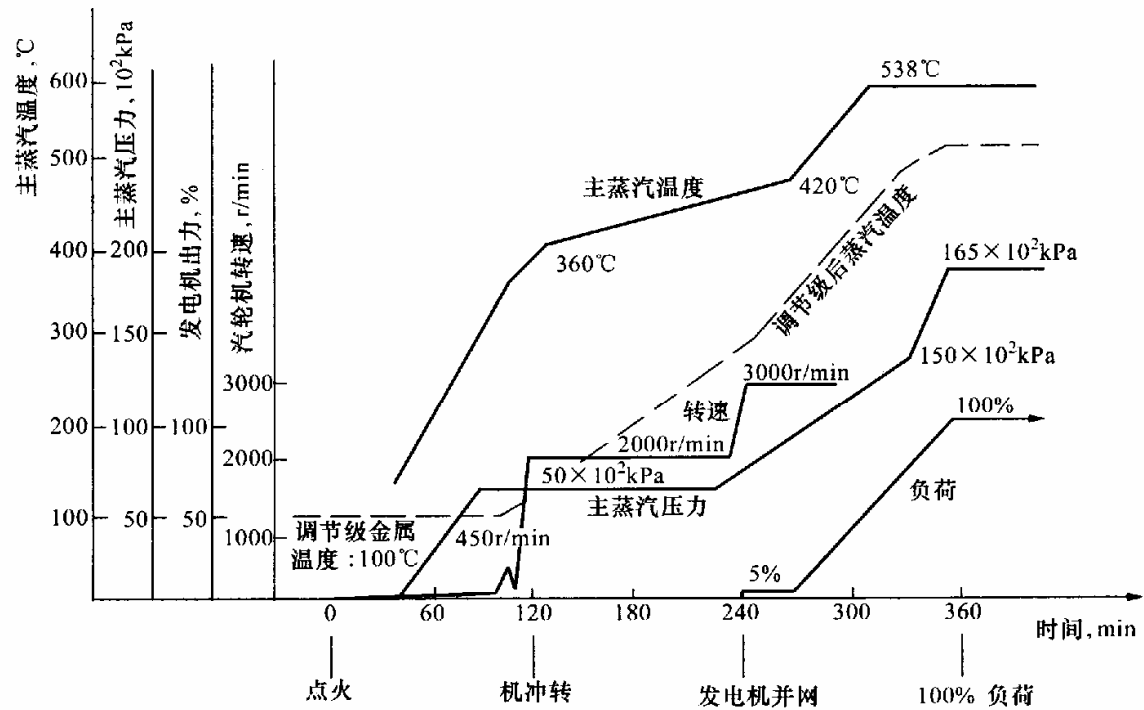


图 3-3 某 350MW 汽轮机标准冷态启动曲线

## ❖ 四、热态启动

### ❖ (一) 热态启动的条件

- ❖ 热态启动前应确认以下条件是否满足：
- ❖ (1) 上下汽缸温差应在允许范围内。
- ❖ (2) 大轴晃度不允许超过规定值。
- ❖ (3) 主蒸汽温度和再热蒸汽温度，应分别高于对应的汽缸金属温度 $50^{\circ}\text{C}$ 以上。
- ❖ (4) 润滑油温不低于 $35-40^{\circ}\text{C}$ 。
- ❖ (5) 胀差应在允许范围内。

- ❖ （二）热态启动的特点
- ❖ 1. 交变热应力
- ❖ 2. 高温轴封汽源
- ❖ 3. 控制热弯曲
- ❖ 4. 启动速度快
- ❖ 5. 控制胀差
- ❖ 6. 启动曲线
- ❖ 7. 对于蒸汽参数的要求高

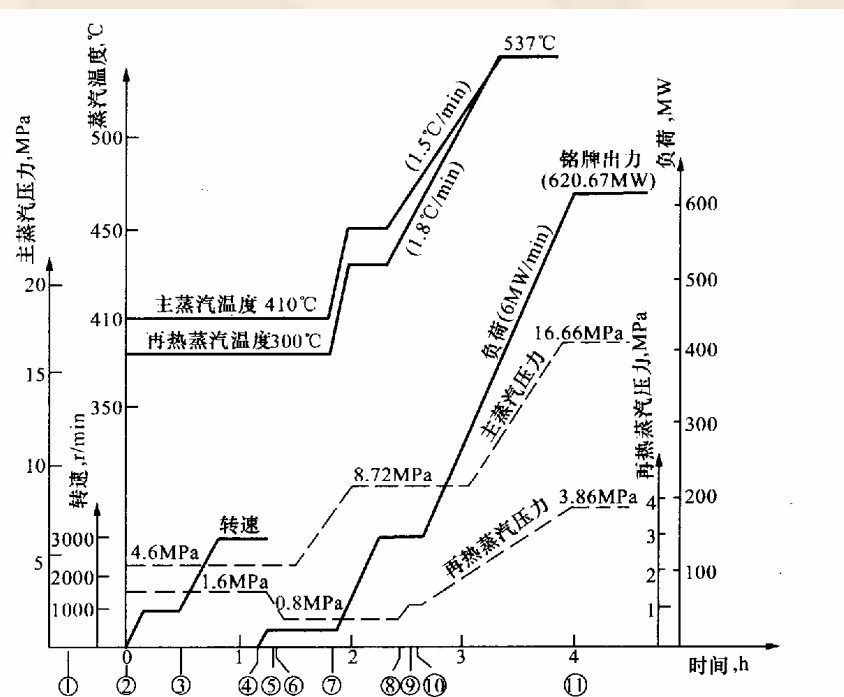
- ❖ 五、中压缸启动
- ❖ （一）实施中压缸启动的条件
- ❖ 实施中压缸启动必须具备的条件
- ❖ 1. 控制的要求
- ❖ 2. 旁路容量的要求
- ❖ 3. 为高压缸设置专用疏水扩容器
- ❖ 4. 对中压调门提出更高的要求
- ❖ 5. 设置高压缸倒暖阀、真空阀
- ❖ 6. 增加一些必要的检测保护手段
- ❖ 7. 改进调节系统

## ❖ (二) 中压缸启动参数的选择

❖ 1. 温度

❖ 2. 压力

❖ 3. 切换负荷的选择



某 600MW 汽轮机冷态中压缸启动曲线

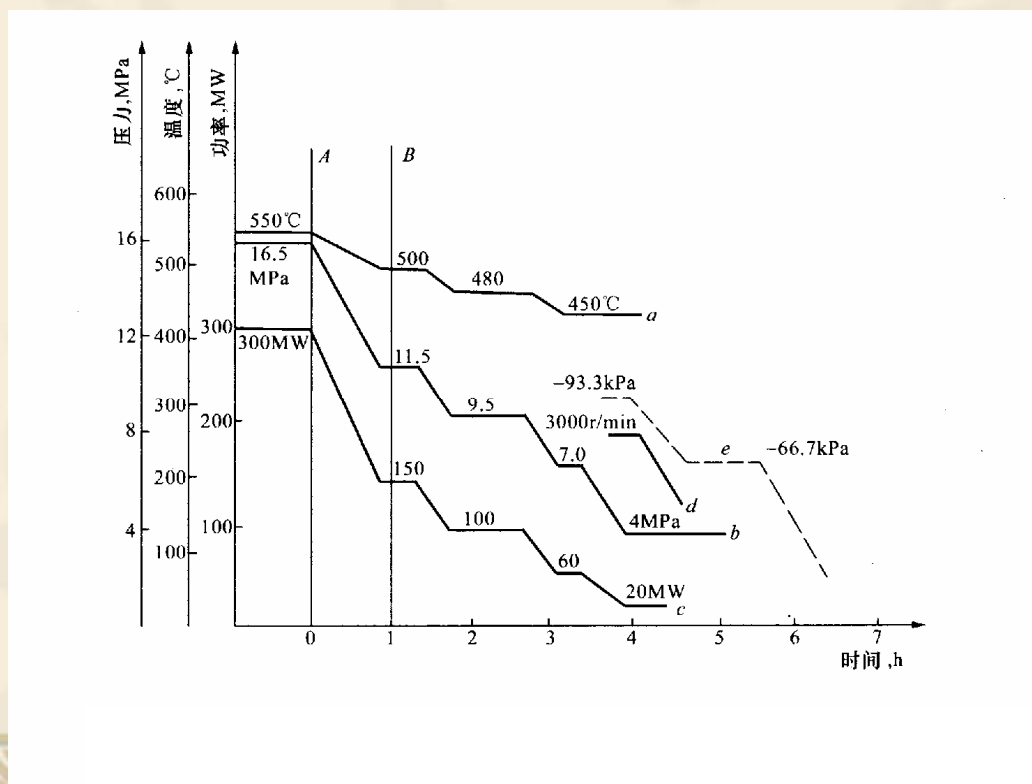
①—锅炉点 轮机启动；③—高压缸；④—并网；⑤—低压旁路阀关闭；  
⑥—高压旁路阀关闭；⑦—增大蒸汽流量，高压/低压旁路阀再次打开；⑧—中压调节阀全开；⑨—低压旁路阀再次关闭；⑩—高压旁路阀再次关闭；⑪—铭牌出力  
高压缸小于 190℃，中压缸小于 150℃



### ❖ （三）中压缸启动的优点

- ❖ 1. 加热均匀，温升合理，减少寿命损耗
- ❖ 2. 高、中压缸热膨胀情况得到改善
- ❖ 3. 消除低压缸鼓风，防止低压缸排汽温度过高
- ❖ 4. 有利于锅炉控制
- ❖ 5. 缩短启动时间，减少启动锅炉燃油费用
- ❖ 6. 允许长时间低负荷运行，利于机组调峰

- ❖ 六、额定参数停机
- ❖ 1. 停机前的准备
- ❖ 2. 减负荷
- ❖ 3. 发电机解列与转子惰走
- ❖ 七、滑参数停机



## ❖ 八、正常停机过程中注意的问题

- ❖ 1. 严密监视机组的参数
- ❖ 2. 关于停盘车
- ❖ 3. 盘车时润滑油系统运行

## ❖ 九、异常停机

一般汽轮发电机在运行过程中，如发生以下严重故障，必须紧急停机：

- ❖ (1) 汽轮发电机组发生强烈振动；
- ❖ (2) 汽轮机发生断叶片或明显的内部撞击声音；
- ❖ (3) 汽轮发电机任何一个轴承发生烧瓦；
- ❖ (4) 汽轮机油系统着大火；
- ❖ (5) 发电机氢密封系统发生氢气爆炸；

- ❖ (6)凝汽器真空急剧下降，真空无法维持；
- ❖ (7)汽轮机严重进冷水、冷汽；
- ❖ (8)汽轮机超速到危急保安器的动作转速而保护没有动作；
- ❖ (9)汽轮发电机房发生火灾，严重威胁到机组安全；
- ❖ (10)发电机空侧密封油系统中断；
- ❖ (11)主油箱油位低到保护动作值而保护没有动作；
- ❖ (12)汽轮机轴向位置突然超限，而保护没有动作。

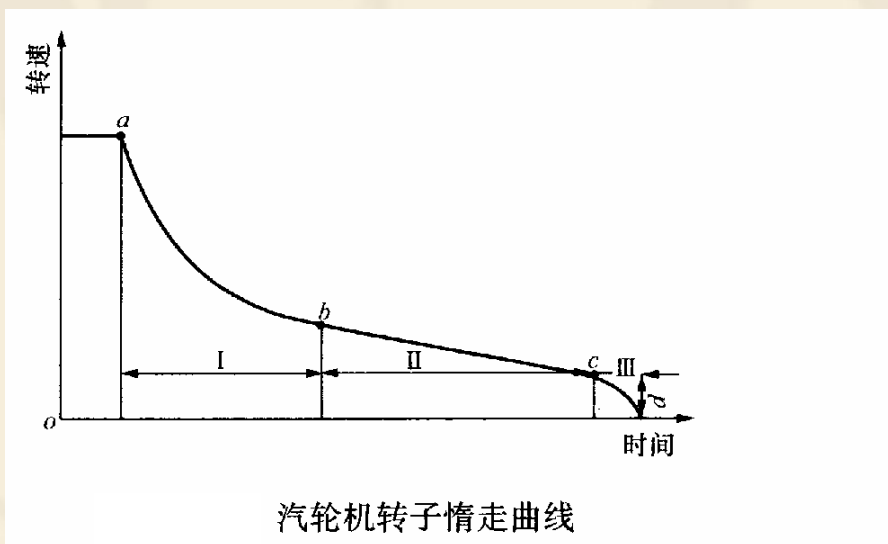
一旦发生事故，只能采用紧急安全措施，打掉危急保安器的挂钩，并从电网中解列。在危急情况下，为加速汽轮机停止转动，可以打开真空破坏阀破坏汽轮机的真空。这样使冷空气进入汽缸，它使叶轮的摩擦鼓风损失增加，对转子增加制动力。减少转子惰走时间，可加速停机。

## ❖ 2.故障停机

一般汽轮发电机在运行过程中，如发生以下故障，应采取故障停机方式：

- ❖ (1)蒸汽管道发生严重漏汽，不能维持运行；
- ❖ (2)汽轮机油系统发生漏油，影响到油压和油位；
- ❖ (3)汽温、汽压不能维持规定值，出现大幅度降低；
- ❖ (4)汽轮机热应力达到限额，仍向增加方向发展；
- ❖ (5)汽轮机调节汽门控制故障；
- ❖ (6)凝汽器真空下降，背压上升至**25KPa**；
- ❖ (7)发电机氢气系统故障；
- ❖ (8)发电机密封油系统仅有空侧密封油泵在运行；
- ❖ (9)发电机检漏装置报警，并出现大量漏水；
- ❖ (10)汽轮机辅助系统故障，影响到主汽轮机的运行。

## ❖ 十、转子的惰走曲线



## ❖ 十一、汽轮机停机后的快速冷却

大机组自然冷却时间

功率 (MW)      600~700    250    125

自然冷却时间 (h) 150~170    90    60

### ❖ 1. 空气强制冷却

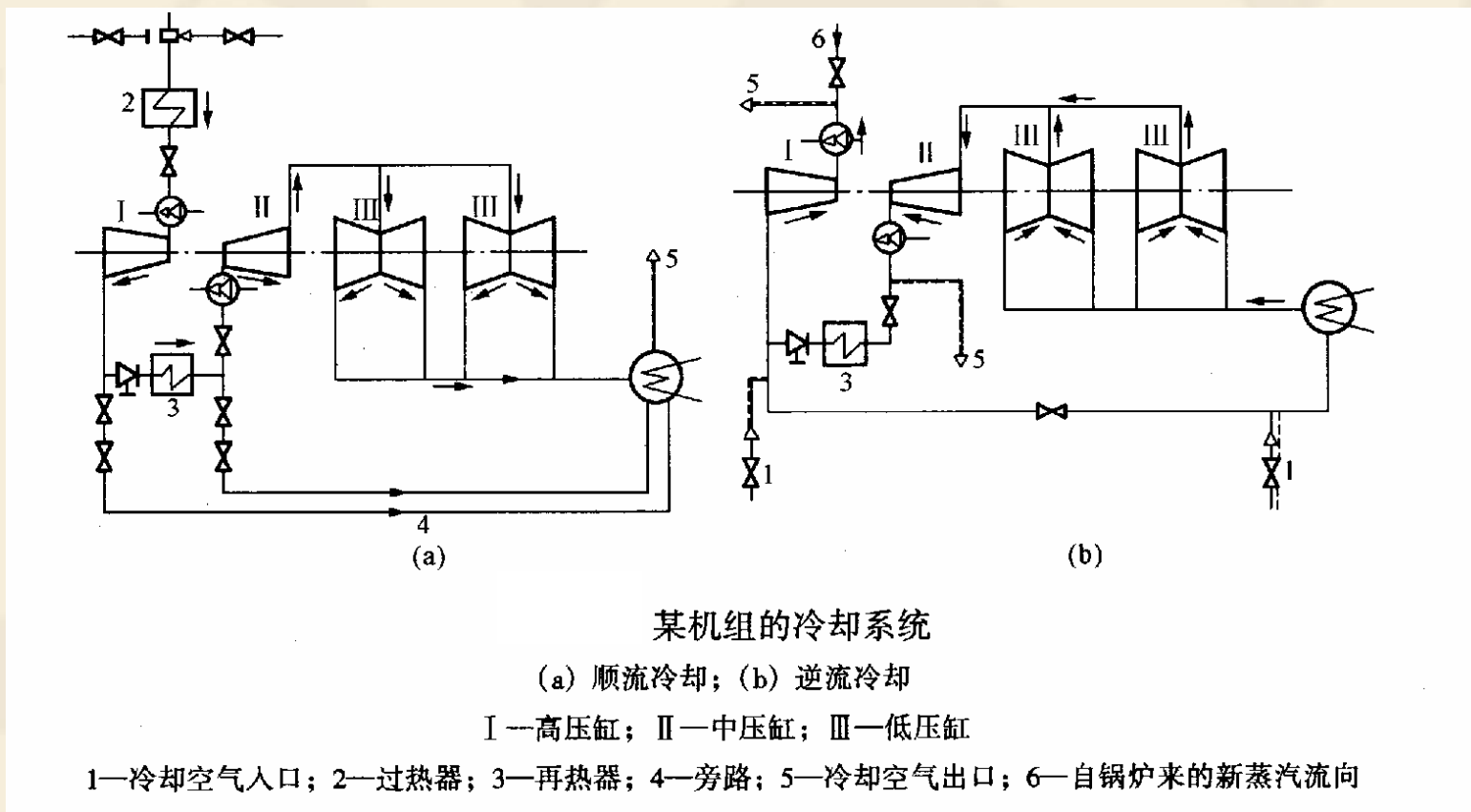
空气强制冷却又称强制通风冷却，它是利用一定温度的空气对汽轮机的高、中压缸进行强制冷却。

#### ❖ 特点：

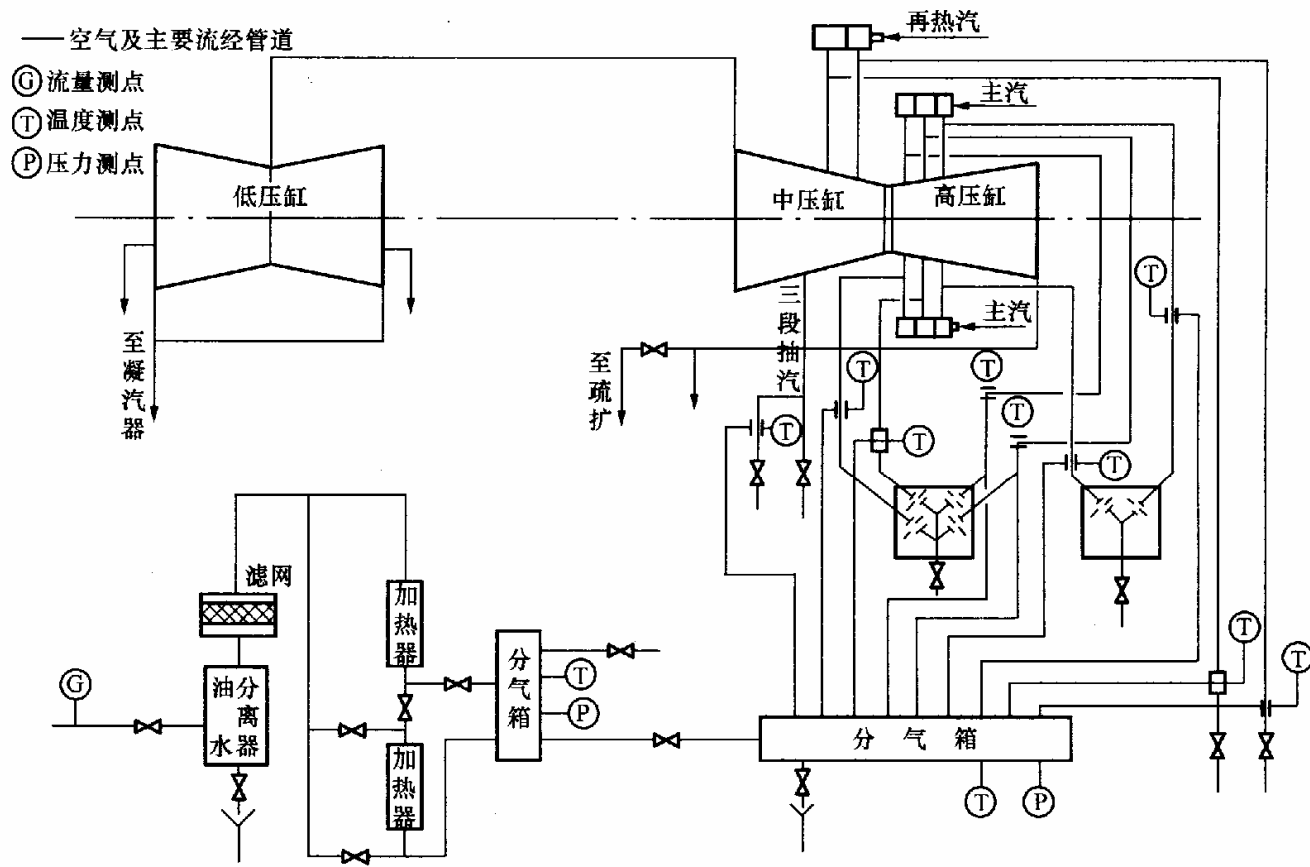
❖ (1) 空气易于调节，且冷却过程中不发生相变，故安全可靠，操作控制方便；

❖ (2) 空气比热小，只是过热蒸汽的1/2，且对流放热系数只有过热蒸汽的1/20，故空气冷却速度比蒸汽慢。

## ❖ (1) 压缩空气冷却

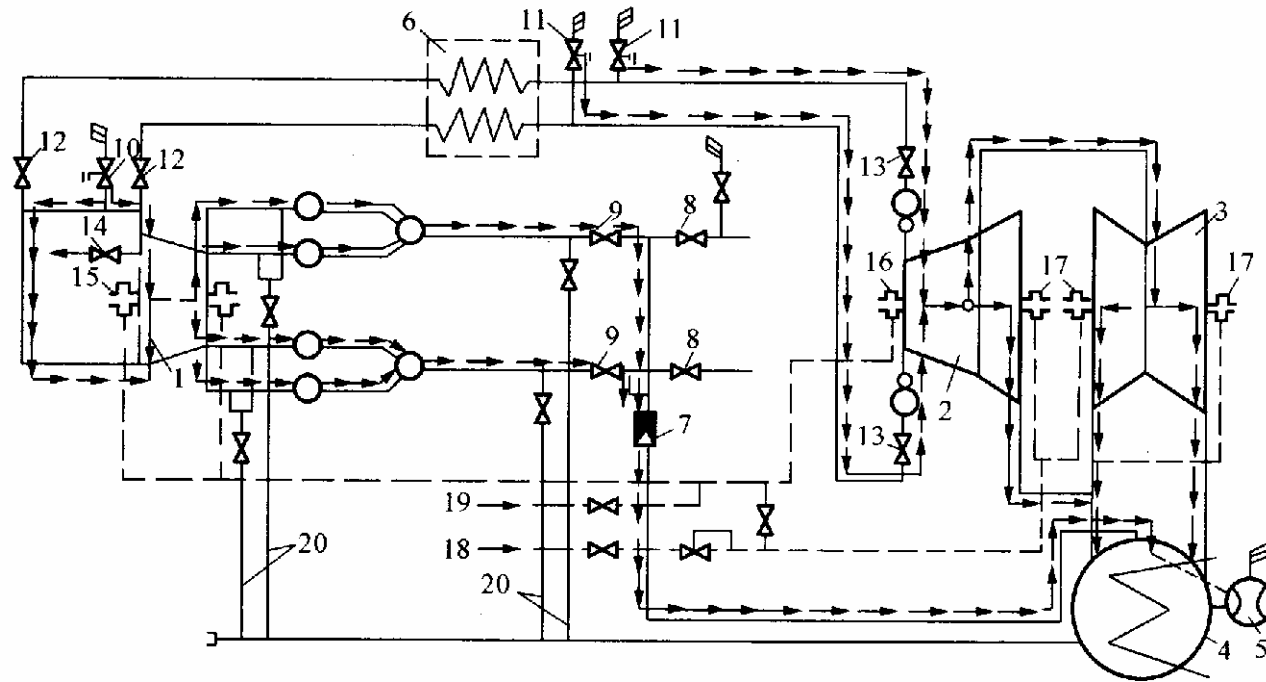






某 300MW 汽轮机强制通风冷却系统

## ❖ (2) 抽真空吸入环境空气冷却



K-300-240 汽轮机空气系统图

1—高压缸；2—中压缸；3—低压缸；4—凝汽器；5—抽气器；6—再热器；7—一级旁路减温减压器；8、9—主汽门；10、11—再热器冷、热段安全阀；12、13、14—截止阀；15、16、17—轴封；18、19—轴封用低温和高温管道；20—疏水管

## ❖ 2. 蒸汽强制冷却

- ❖ 冷却蒸汽的汽源可以有如下几种：取自临炉和临机的抽汽；取自除氧器平衡管；利用锅炉余热或投锅炉底部加热产生微量蒸汽。

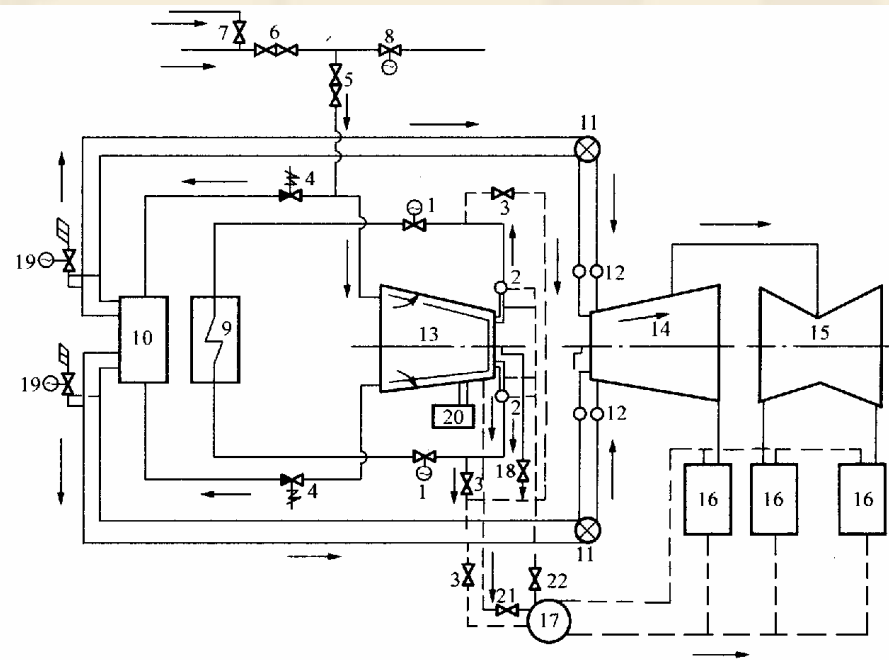


图 3-25 200MW 汽轮机蒸汽冷却系统图

1—电动主闸阀；2—高压调节阀；3—疏水阀；4—止回阀；5—蒸汽快冷进汽阀；6—邻机二、回抽汽至快冷门；7—除氧器平衡汽至快冷门；8—本机回抽段抽汽电动门；9—过热器；10—再热器；11—中压主汽门；12—中压调速汽门；13—高压缸；14—中压缸；15—低压缸；16—凝汽器；17—疏水扩容器；18—高压轴封一段抽汽；19—再热器向空排汽门；20—法兰螺栓加热；21—调节级疏水；22—管道及调节阀疏水

